

第8章 数模和模数转换

教学内容

§ 8.1 概述

§ 8.2 D/A转换器

§ 8.3 A/D转换器

教学要求

- 1、掌握DAC和ADC的定义及应用；
- 2、理解解DAC的组成、倒T型电阻网络、集成D/A转换器、转换精度及转换速度；
- 3、理解ADC组成、逐次逼近型A/D转换器、积分型A/D转换器、转换精度及转换速度。

8.1 概述

模一数转换（A/D转换）：将模拟信号转换为数字信号。实现A/D转换的电路称为A/D转换器，简称为ADC(Analog-Digital Converter)

数一模转换（D/A转换）：将数字信号转换为模拟信号。实现D/A转换的电路称为D/A转换器，简称为DAC(Digital-Analog Converter)

8.2 D/A转换器

将数字信号转换为模拟信号的电路。

例如：对于0 ~ 5V的直流电压，计算机用8位数字量来描述时：

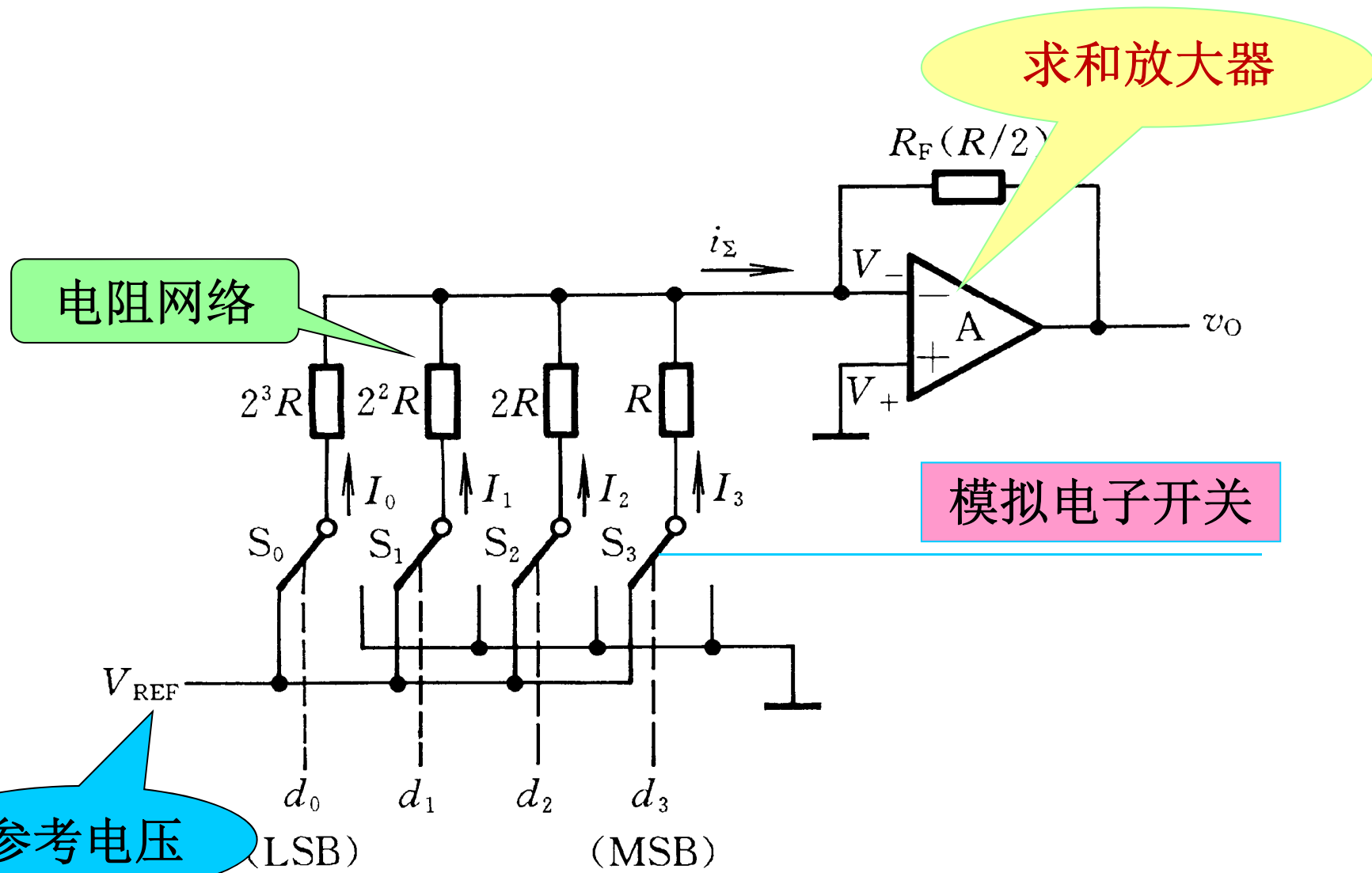
最小值（00000000）B = 0对应0V，

最大值（11111111）B = 255 对应 5V，

中间值（01111111）B = 127 对应2.5V 等

D/A的任务是接收到一个数字量后，给出一个相应的电压。比如收到（00111111）B，应给出幅度为1.25V 的电压。

一、权电阻网络D/A转换器



集成运放通过 R_F 接入负反馈，有虚短， $V_- \approx V_+ = 0$

$$v_o = -R_F i_\Sigma = -R_F (I_3 + I_2 + I_1 + I_0)$$

$$I_3 = \frac{V_{REF}}{R} d_3 \qquad I_2 = \frac{V_{REF}}{2R} d_2$$

$$I_1 = \frac{V_{REF}}{2^2 R} d_1 \qquad I_0 = \frac{V_{REF}}{2^3 R} d_0$$

$$v_o = -\frac{V_{REF}}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0)$$

n 位权电阻网络D/A转换器，当反馈电阻取为 **$R/2$** 时，输出电压的计算公式：

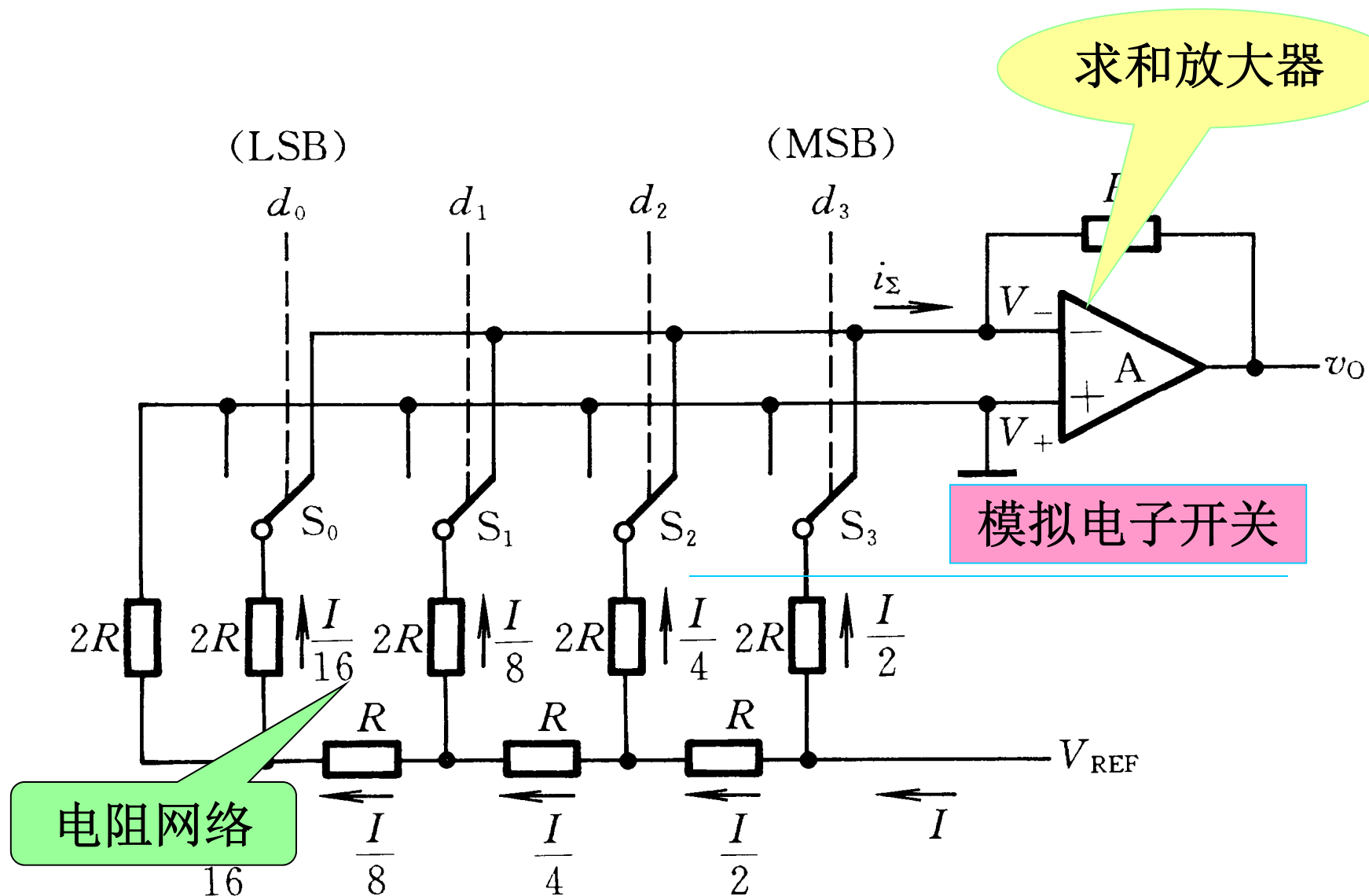
$$v_o = -\frac{V_{REF}}{2^n} (d_{n-1}2^{n-1} + d_{n-2}2^{n-2} + \dots + d_12^1 + d_02^0)$$

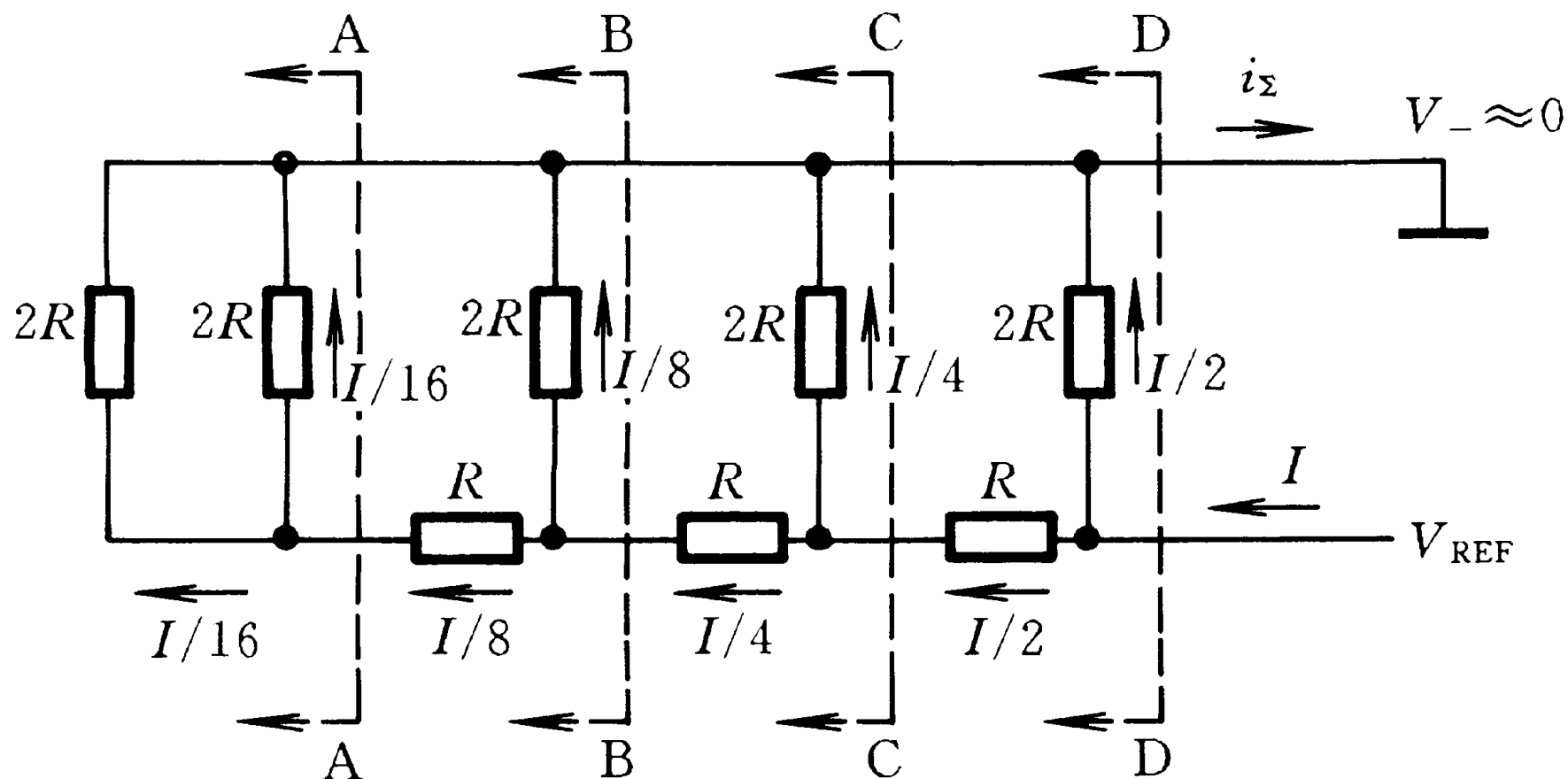
输出电压的变化范围： $0 \sim -\frac{2^n - 1}{2^n} V_{REF}$

优点：结构简单，所用的电阻元件数很少。

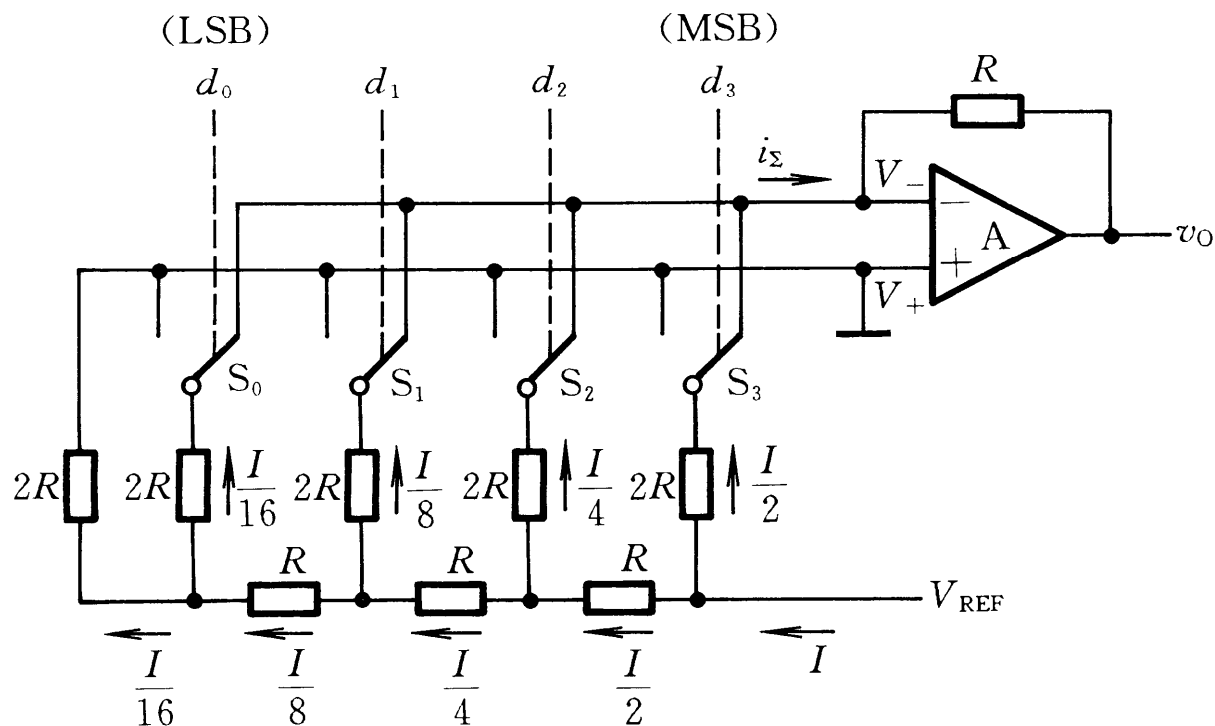
缺点：各电阻的阻值相差较大，不能保证有很高的精度。

二、倒T形电阻网络D/A转换器





由于 $V_- \approx V_+ = 0$, 所以开关S合到哪一边, 都相当于接到了“地”电位, 流过每条电路的电流始终不变。可等效为:



$$i_\Sigma = \frac{I}{2}d_3 + \frac{I}{4}d_2 + \frac{I}{8}d_1 + \frac{I}{16}d_0 \quad \text{取 } R_F = R \quad I = \frac{V_{REF}}{R}$$

$$v_o = -Ri_\Sigma = -\frac{V_{REF}}{2^4}(d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0)$$

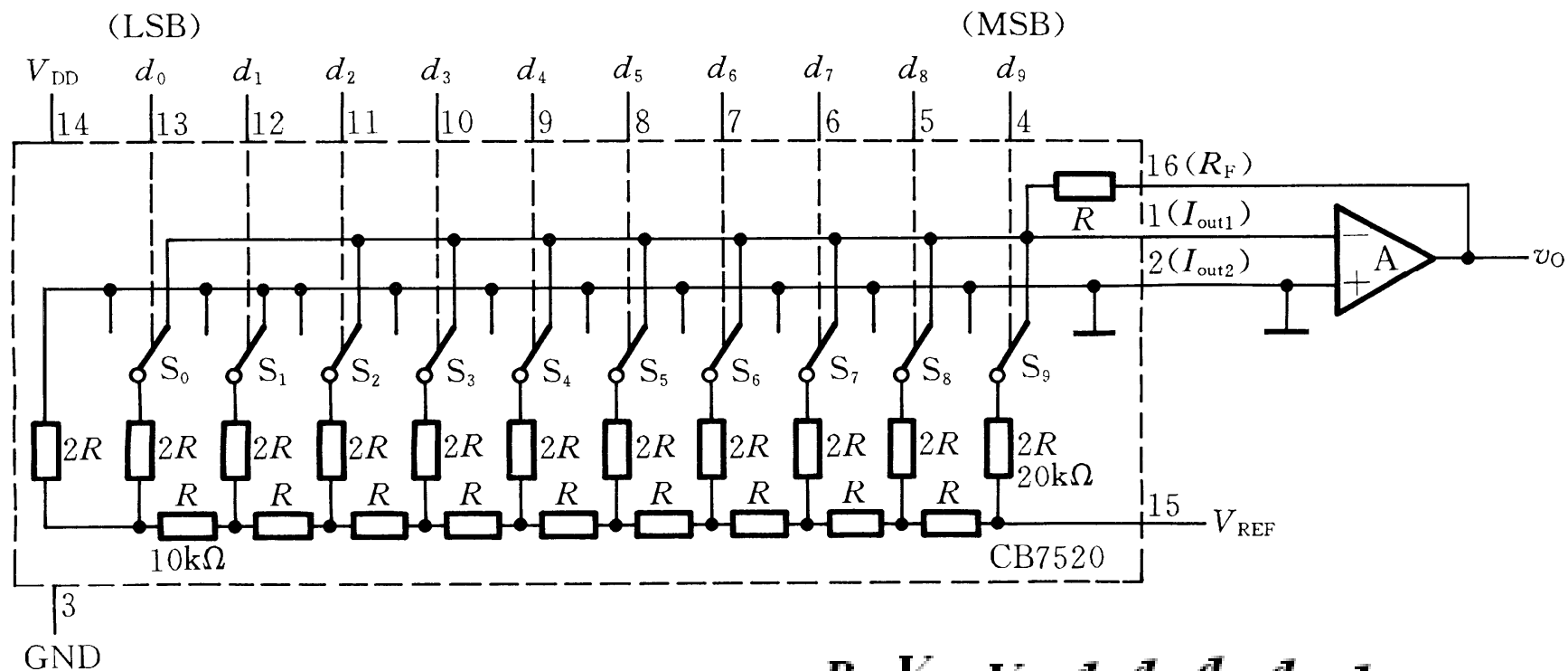
n 位输入的倒T形电阻网络D/A转换器，当反馈电阻取为R时，输出电压的计算公式：

$$v_o = -\frac{V_{REF}}{2^n} (d_{n-1}2^{n-1} + d_{n-2}2^{n-2} + \dots + d_12^1 + d_02^0)$$

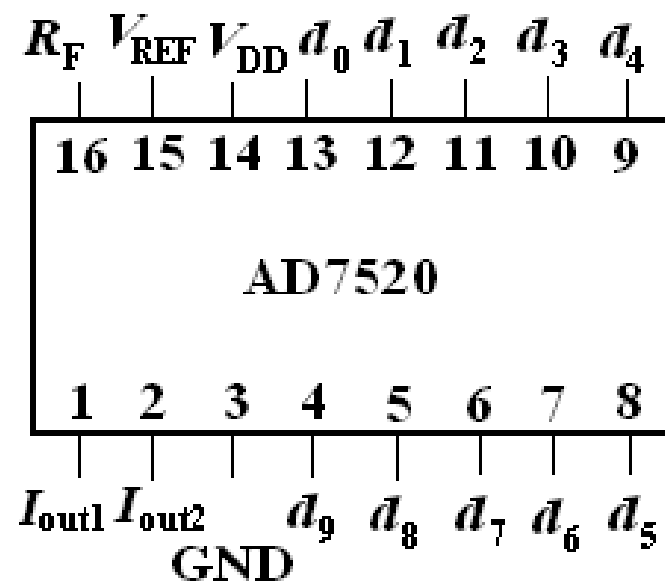
优点：

(1) 只有R和2R两种阻值的电阻，可达到较高的精度；

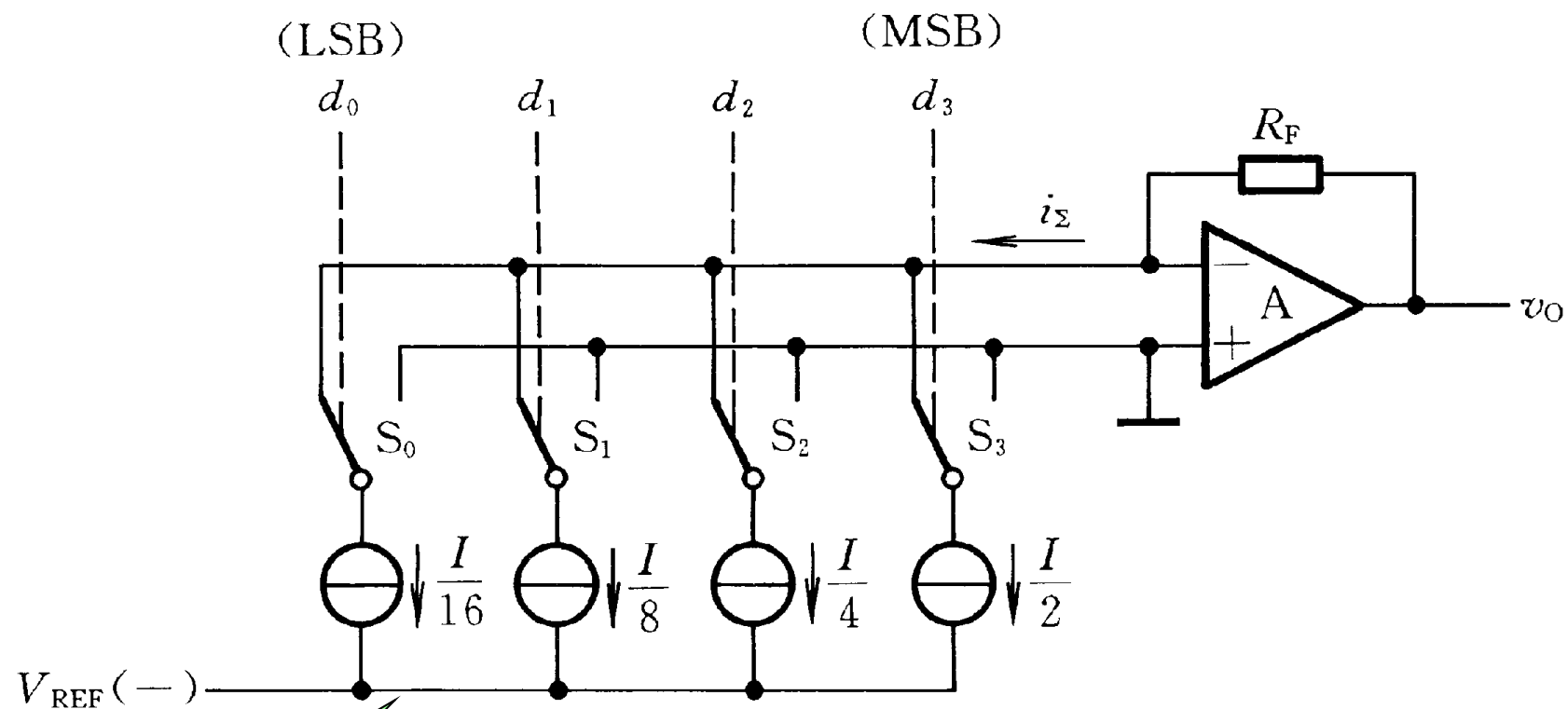
(2) 各支路电流恒定不变，在开关状态变化时，不需电流建立时间，所以电路转换速度快，使用广泛。



AD7520电路原理图



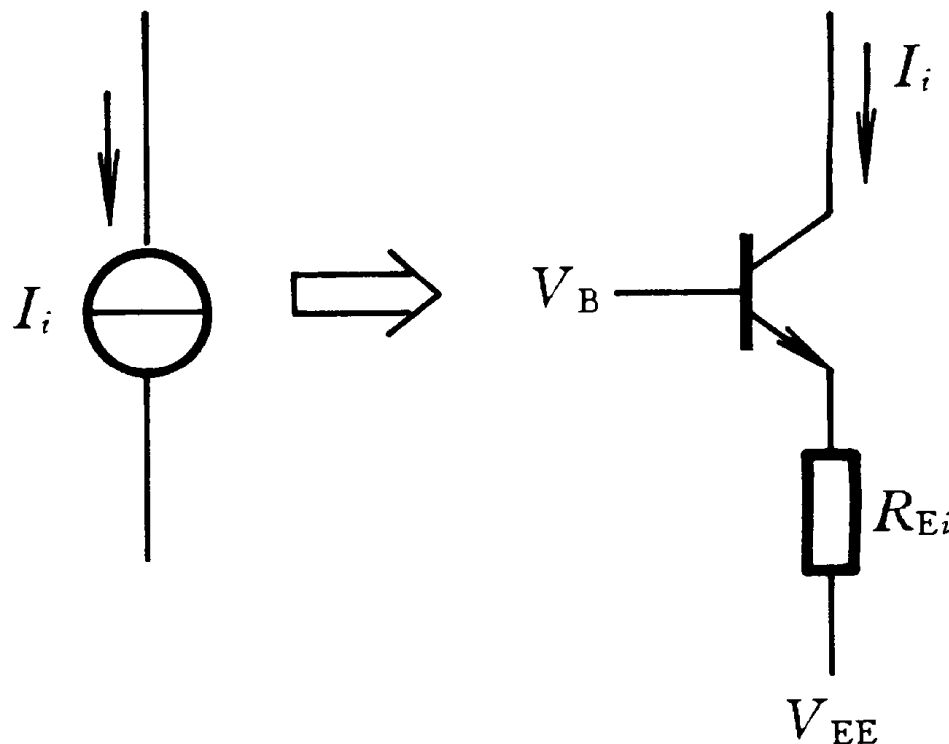
三、权电流型D/A转换器



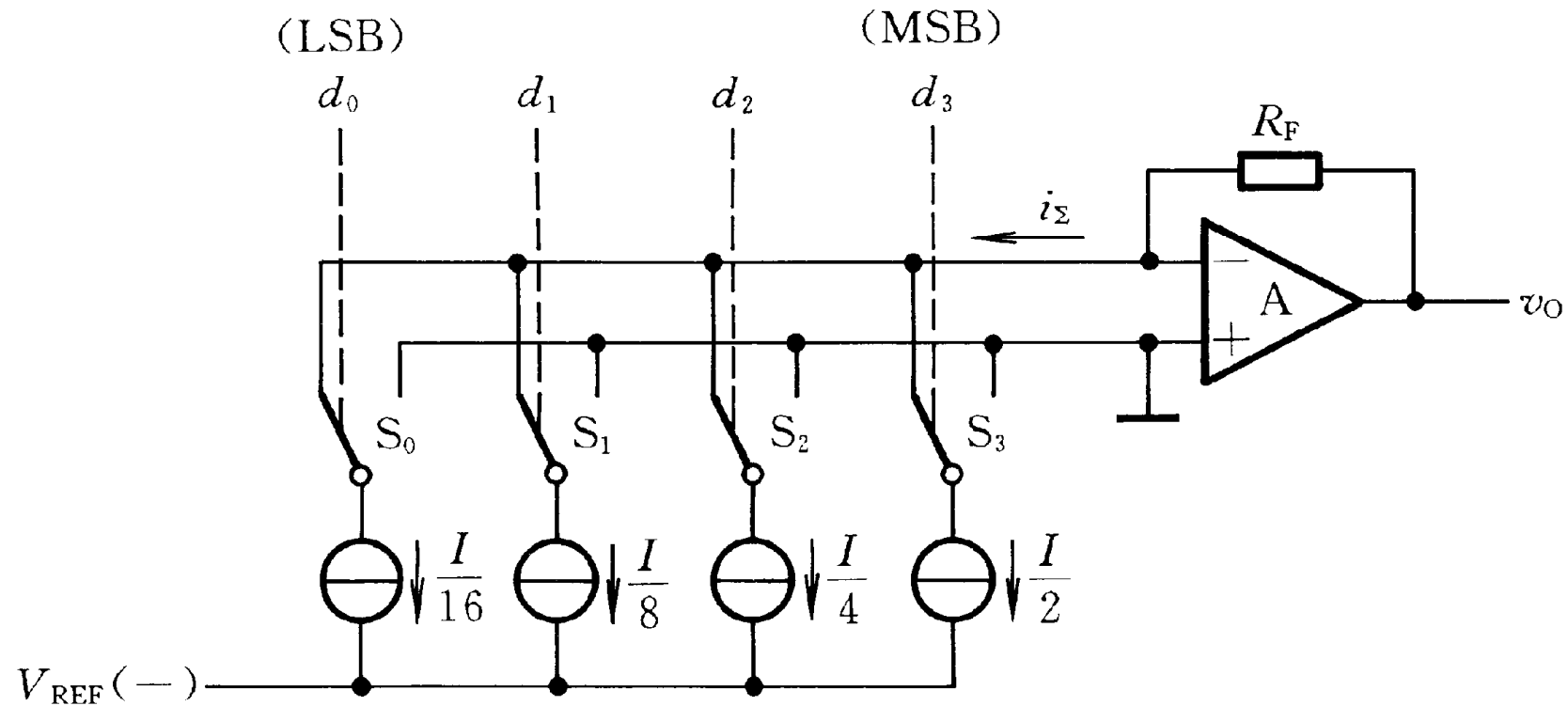
恒流源

恒流源模型：

$$I_i \approx \frac{V_B - V_{EE} - V_{BE}}{R_{Ei}}$$



只要电路工作时保证 V_B 和 V_{EE} 稳定不变，则三极管的集电极电流即可保持恒定，不受开关内阻的影响。

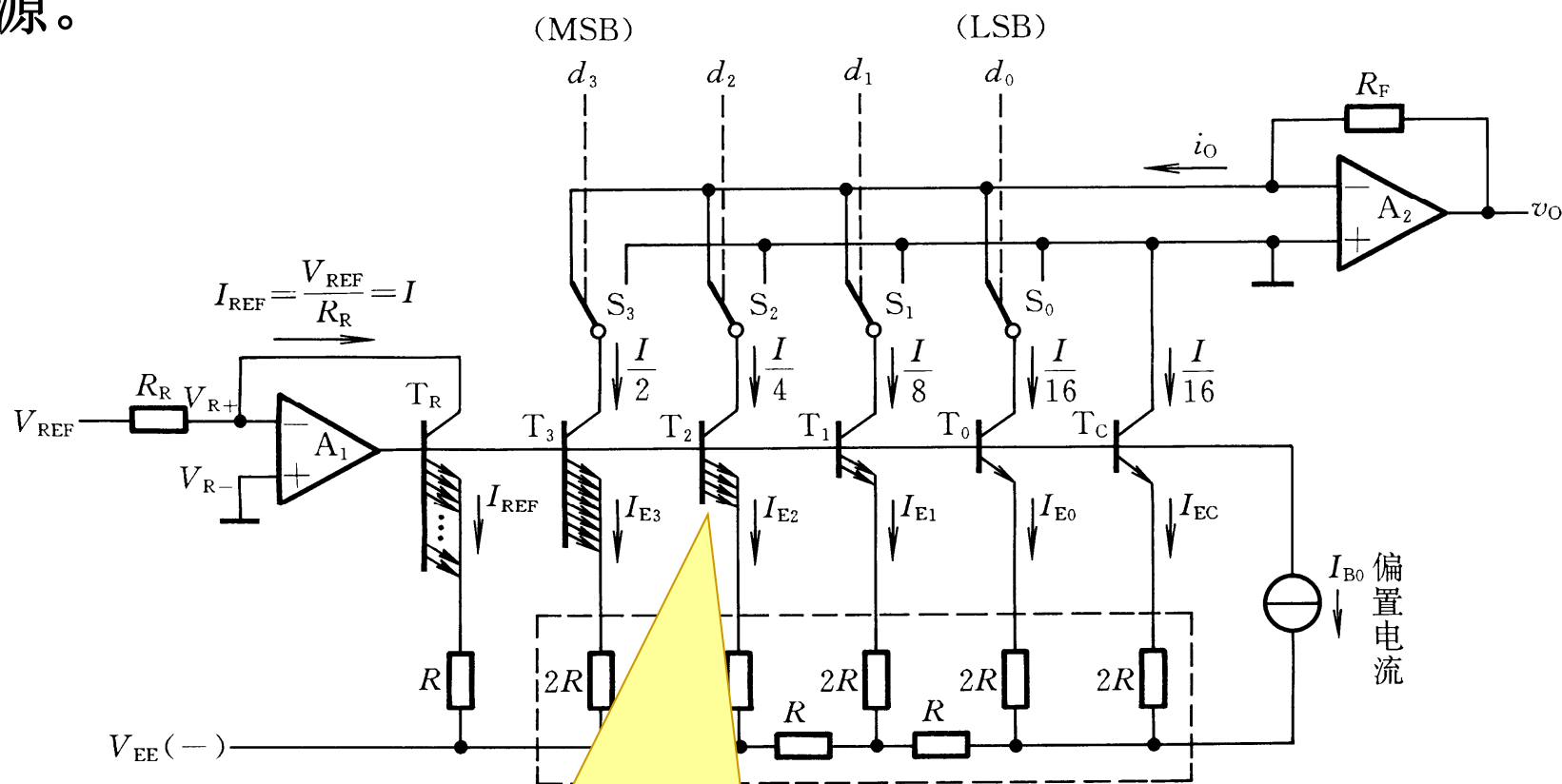


$$v_o = i_\Sigma R_F$$

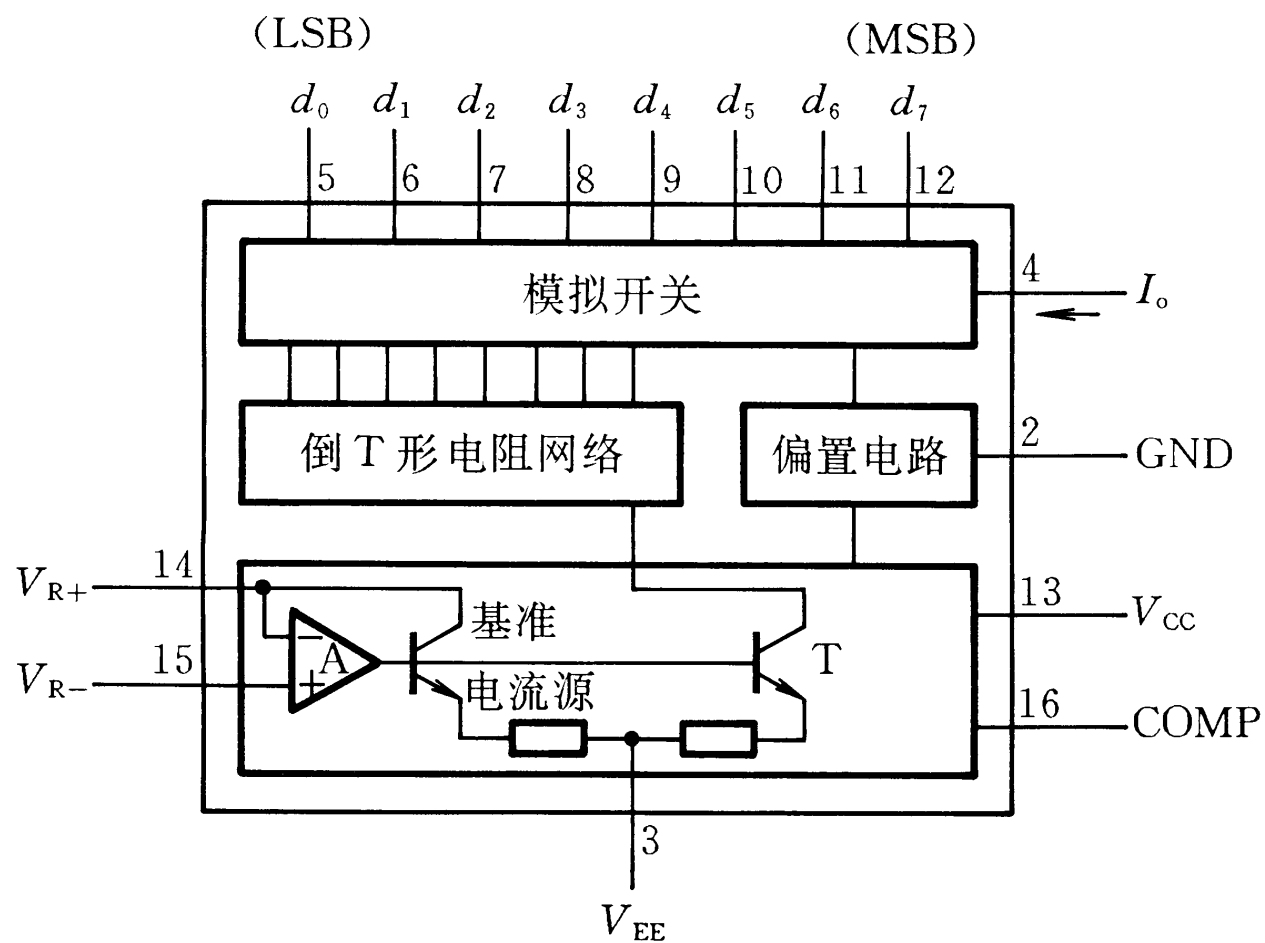
$$= R_F \left(\frac{I}{2} d_3 + \frac{I}{2^2} d_2 + \frac{I}{2^3} d_1 + \frac{I}{2^4} d_0 \right)$$

$$= \frac{R_F I}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0)$$

为减少电阻阻值的种类，在实用的权电流型D/A转换器中，经常利用倒T形电阻网络的分流作用产生一组所需的恒流源。



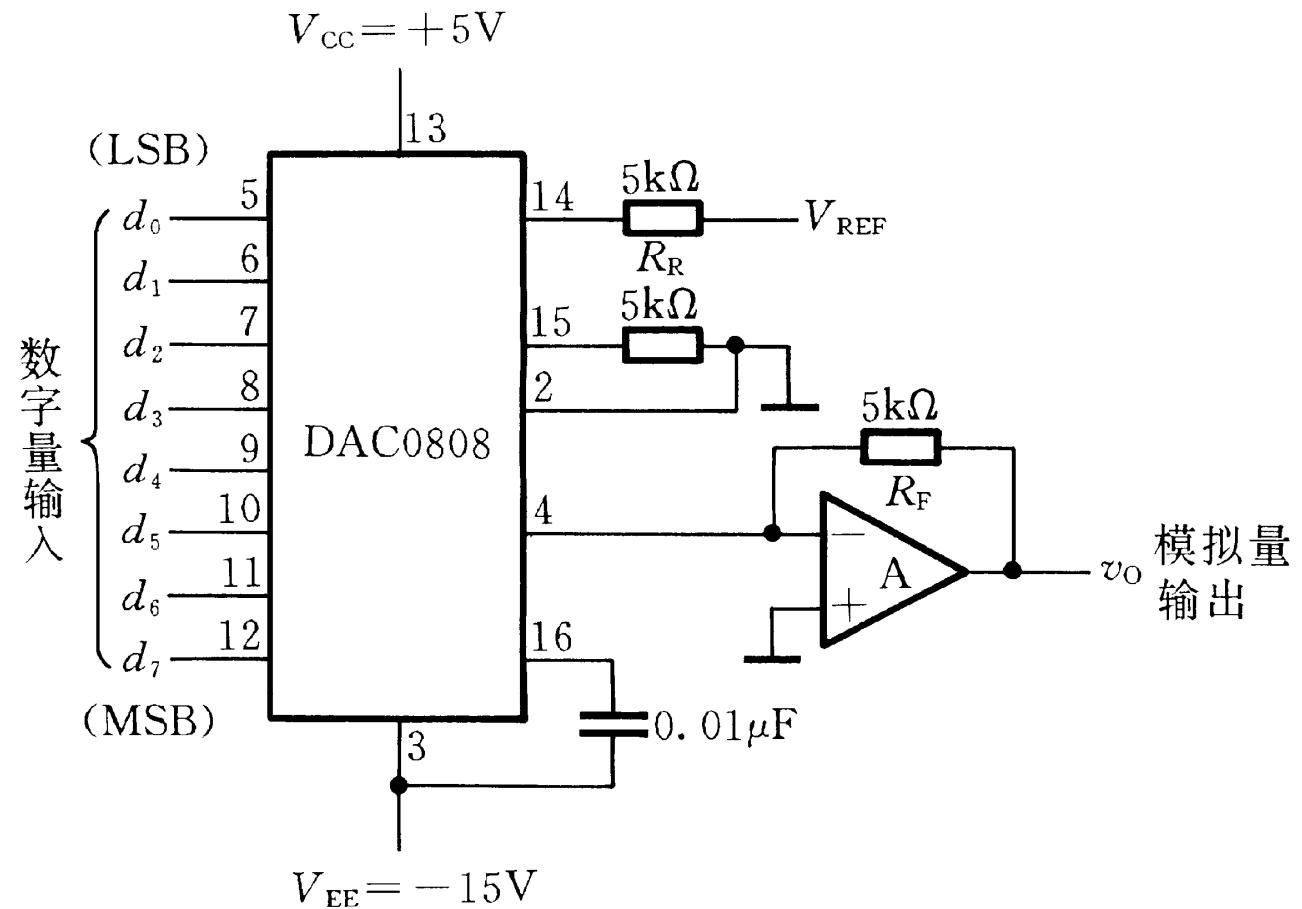
按比例加大发射结的面积



DAC0808电路结构框图

$$R_R = 5k\Omega$$

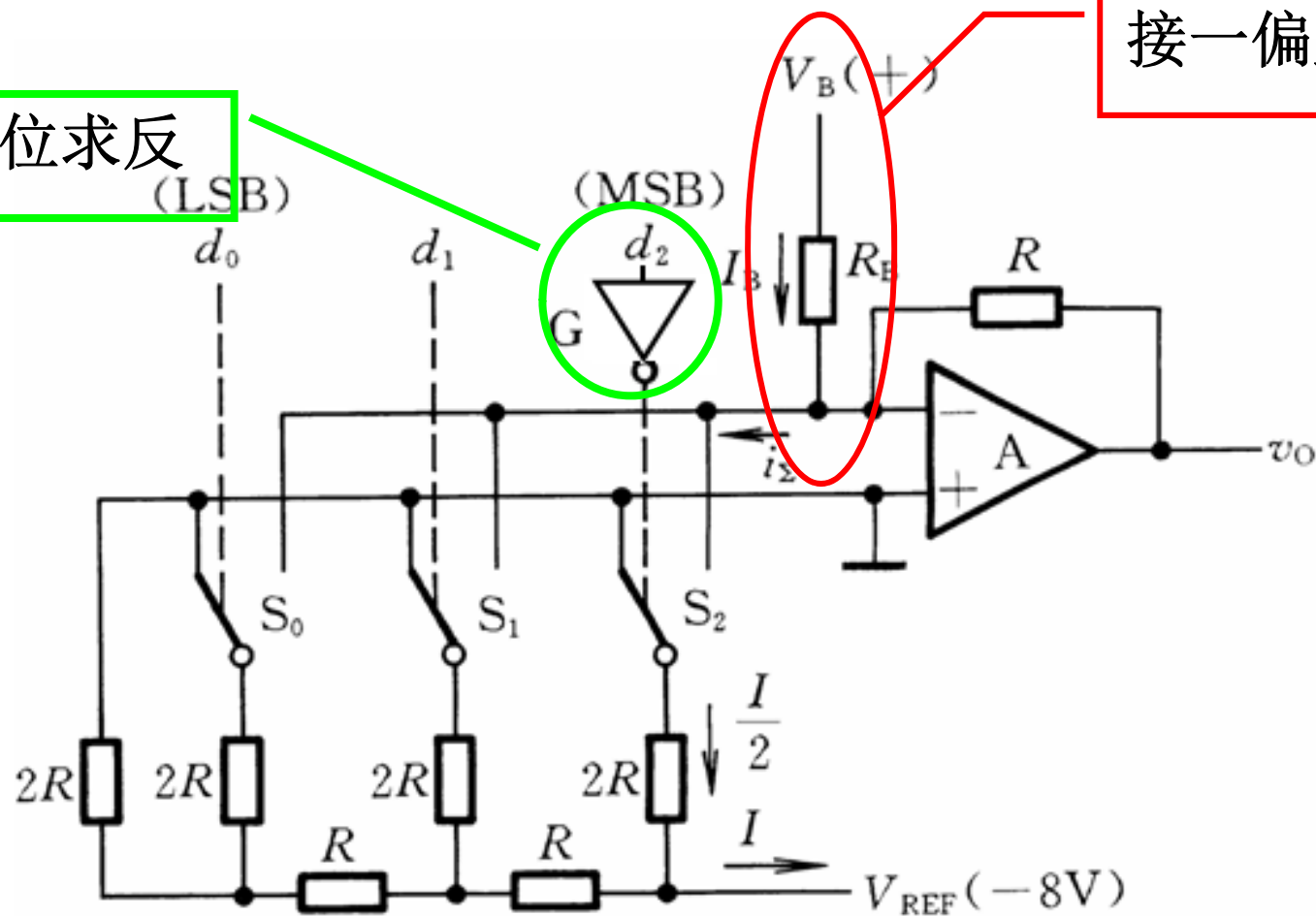
$$R_F = 5k\Omega$$



$$v_o = \frac{R_F I}{2^8} D_n = \frac{R_F}{2^8} \cdot \frac{V_{REF}}{R_R} D_n = \frac{10}{2^8} D_n$$

四、具有双极性输出的D/A转换器

符号位求反



8.3 D/A转换器的转换精度和转换速度

1.D/A转换器的转换精度

(1) 分辨率：**D/A**转换器理论上可达到的精度。

分辨率可以用输入二进制数码的位数给出。

分辨率也可用**D/A**转换器能够分辨出来的最小输出电压与最大输出电压的比值来表示。**10位D/A**转换器的分辨率为：

$$\frac{1}{2^{10} - 1} = \frac{1}{1023} \approx 0.001$$

(2) **转换误差**：**D/A**转换器实际上能达到的转换精度。

可以用**输出电压满刻度值的百分数**表示，也可用最低位有效值的倍数表示。

如：转换误差为**0.5LSB**，表示输出模拟电压的绝对误差等于当输入数字量的**LSB=1**时，其余各位均为**0**时输出模拟电压的一半。

转换误差可分为**静态误差**和**动态误差**。产生静态误差的原因是基准电源不稳定、运放的零点漂移、模拟开关导通时的内阻和压降及电阻网络中阻值的偏差等；动态误差则是在转换的动态过程中产生的附加误差。

2.D/A转换器的转换速度

(1) **建立时间 t_{set}** : 指输入数字量各位由全0变为全1或由全1变为全0时,输出电压达到某一规定值所需要的时间。通常建立时间在100 ns ~几十 μs 之间。

(2) **转换速率 S_R** : 指输入数字量各位由全0变为全1或由全1变为全0时, 输出电压的变化率。

8.4 A / D转换器

输入模拟电压

U_I

0

~

5V



A/D

输出数字量

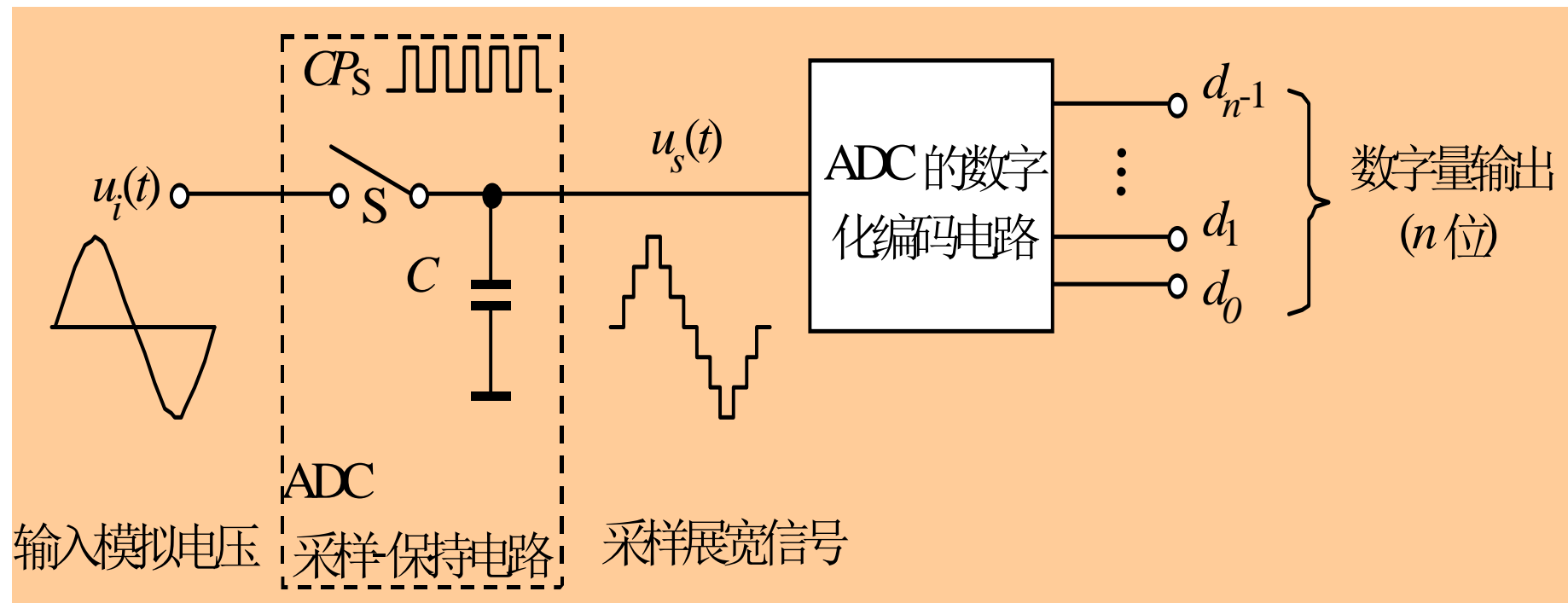
$D_7 \sim D_0$

00000000

~

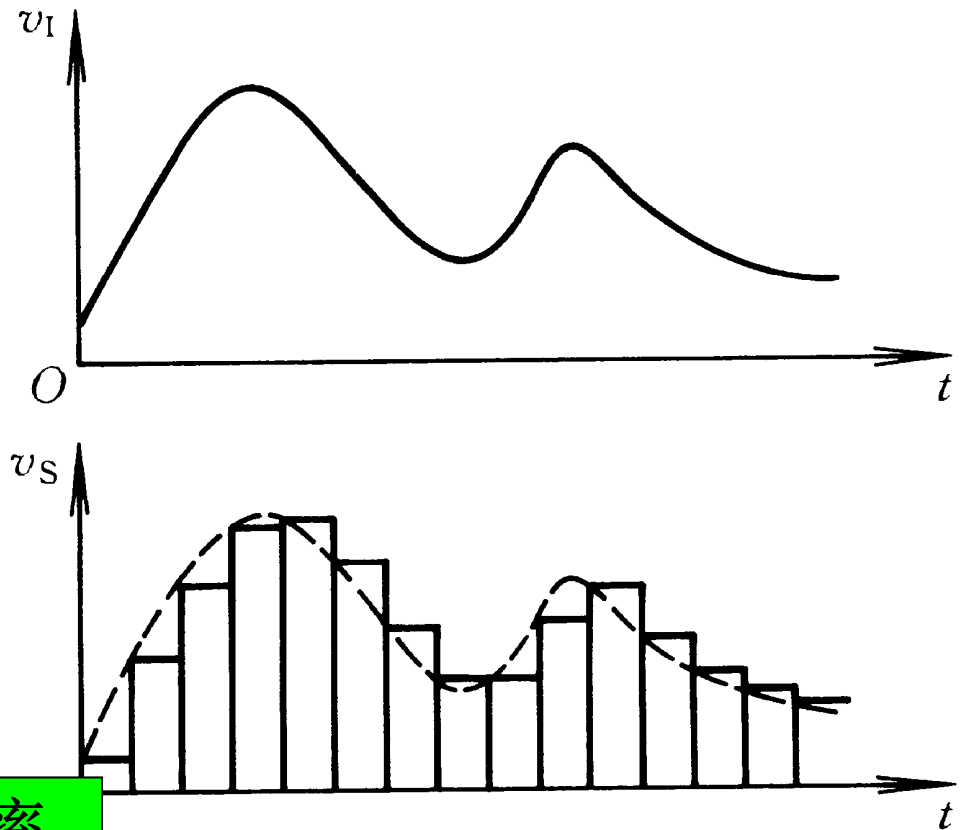
11111111

一、A/D转换的基本原理



取样—保持

取样是对模拟信号进行周期性地抽取样值的过程，就是把随时间连续变化的信号转换成在时间上断续、在幅度上等于取样时间内模拟信号的一串脉冲。



取样频率

输入模拟信号的最高频率分量的频率

取样定理: $f_s \geq 2f_{i(\max)}$

量化—编码

将取样—保持电路的输出电压，按某种近似方式归化到与之相应的离散电平上，这一转化过程称为数值量化，简称**量化**。

将取样电压表示为一个最小单位的整数倍，所取的最小数量单位称为**量化单位**，用 Δ 表示。

量化后的数值最后还须通过编码过程用一个代码表示出来，这一过程称为**编码**。

输入信号	二进制代码	代表的模拟电压
1V	111	$7\Delta = 7/8 \text{ (V)}$
7/8V	110	$6\Delta = 6/8 \text{ (V)}$
6/8V	101	$5\Delta = 5/8 \text{ (V)}$
5/8V	100	$4\Delta = 4/8 \text{ (V)}$
4/8V	011	$3\Delta = 3/8 \text{ (V)}$
3/8V	010	$2\Delta = 2/8 \text{ (V)}$
2/8V	001	$1\Delta = 1/8 \text{ (V)}$
1/8V	000	$0 = 0 \text{ (V)}$
0		

取 $\Delta = \frac{1}{8}$

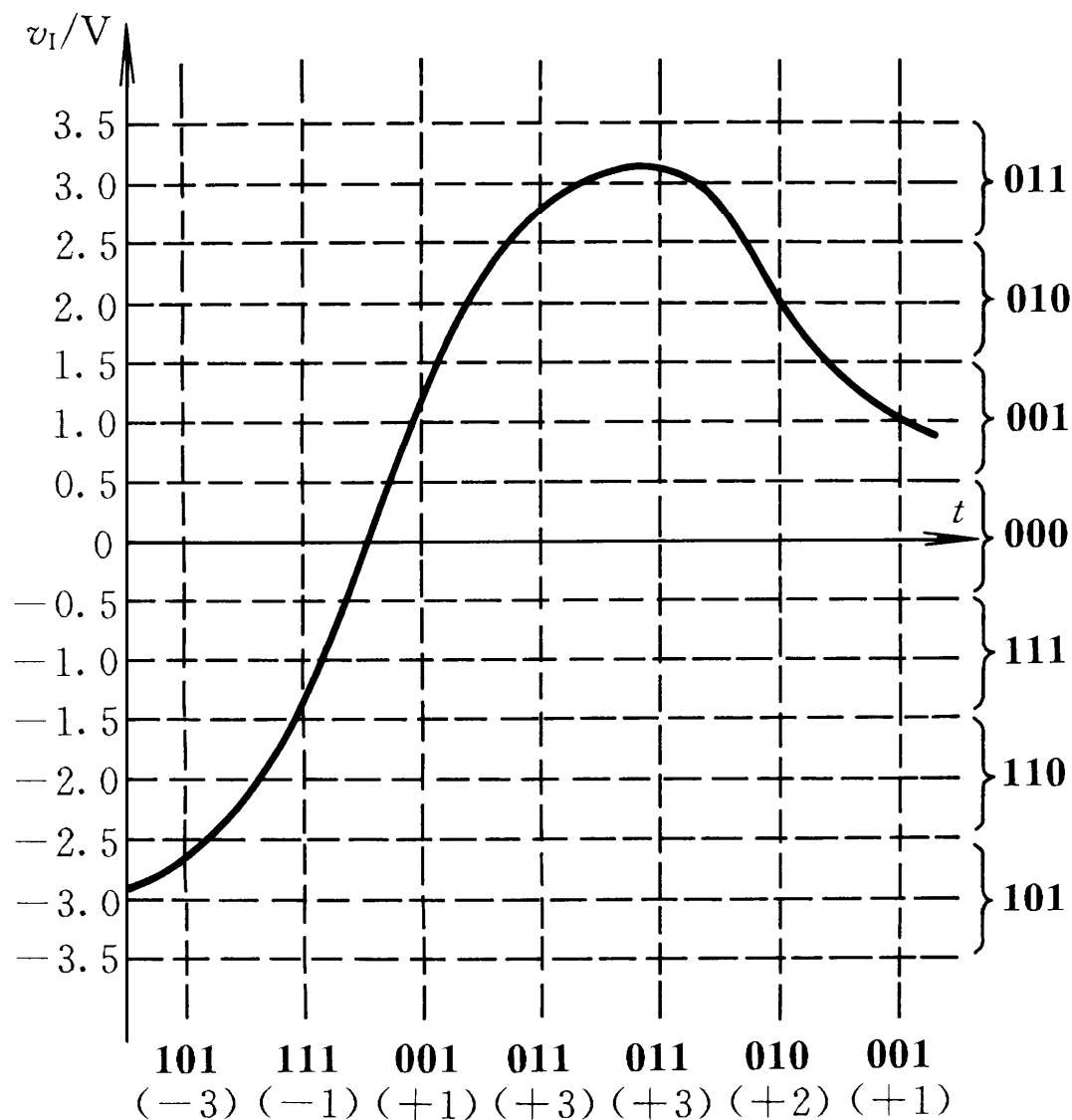
最大量化误差为 Δ ，即 $1/8\text{V}$

输入信号	二进制代码	代表的模拟电压
1V	111	$7\Delta = 14/15 \text{ (V)}$
13/15V	110	$6\Delta = 12/15 \text{ (V)}$
11/15V	101	$5\Delta = 10/15 \text{ (V)}$
9/15V	100	$4\Delta = 8/15 \text{ (V)}$
7/15V	011	$3\Delta = 6/15 \text{ (V)}$
5/15V	010	$2\Delta = 4/15 \text{ (V)}$
3/15V	001	$1\Delta = 2/15 \text{ (V)}$
1/15V	000	$0 = 0 \text{ (V)}$
0		

取 $\Delta = \frac{2}{15}$

最大量化误差为 $1/2\Delta$ ，即 $1/15\text{V}$

对双极性模拟电压的量化和编码

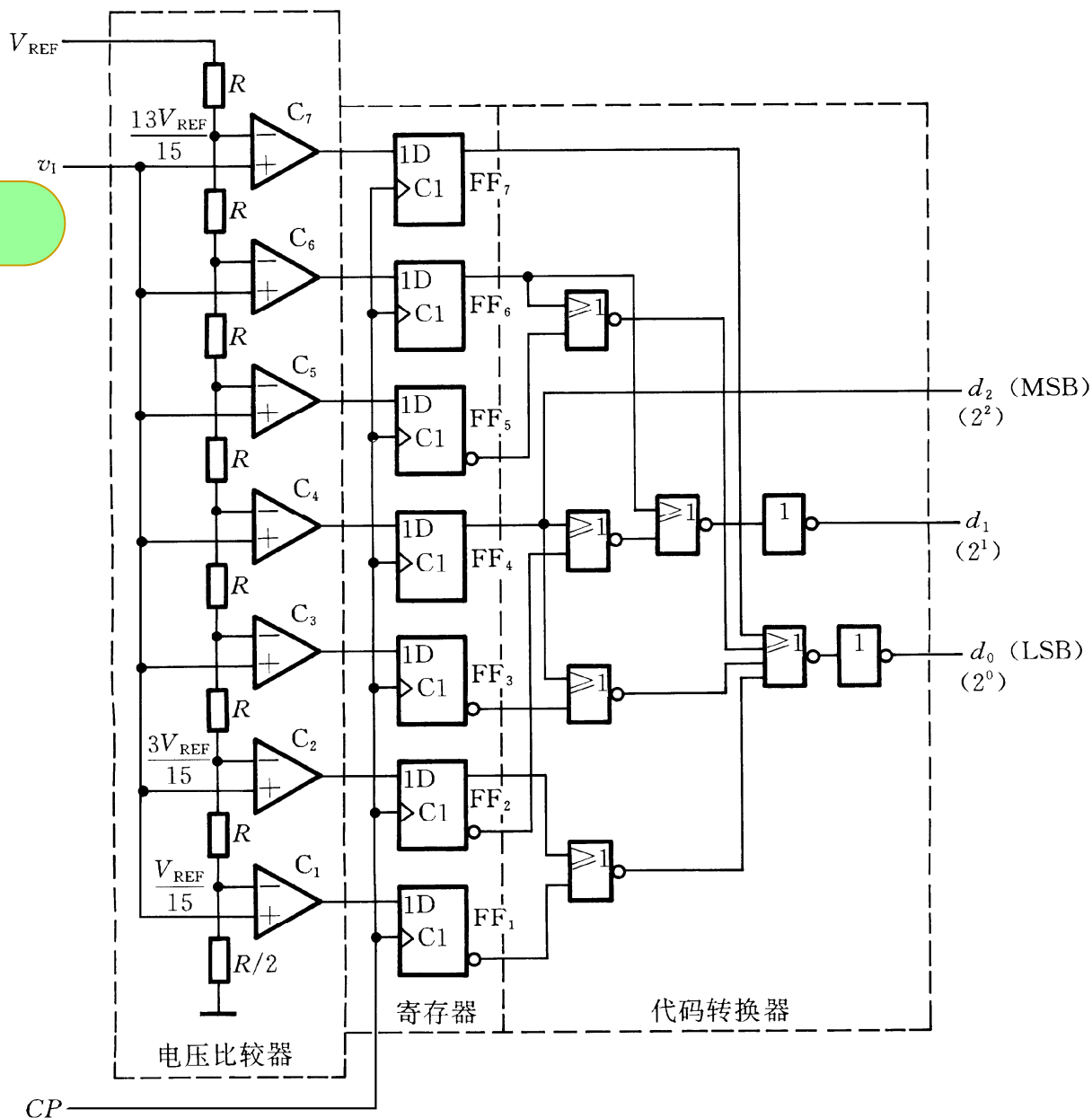


二进制
补码的
形式编
码

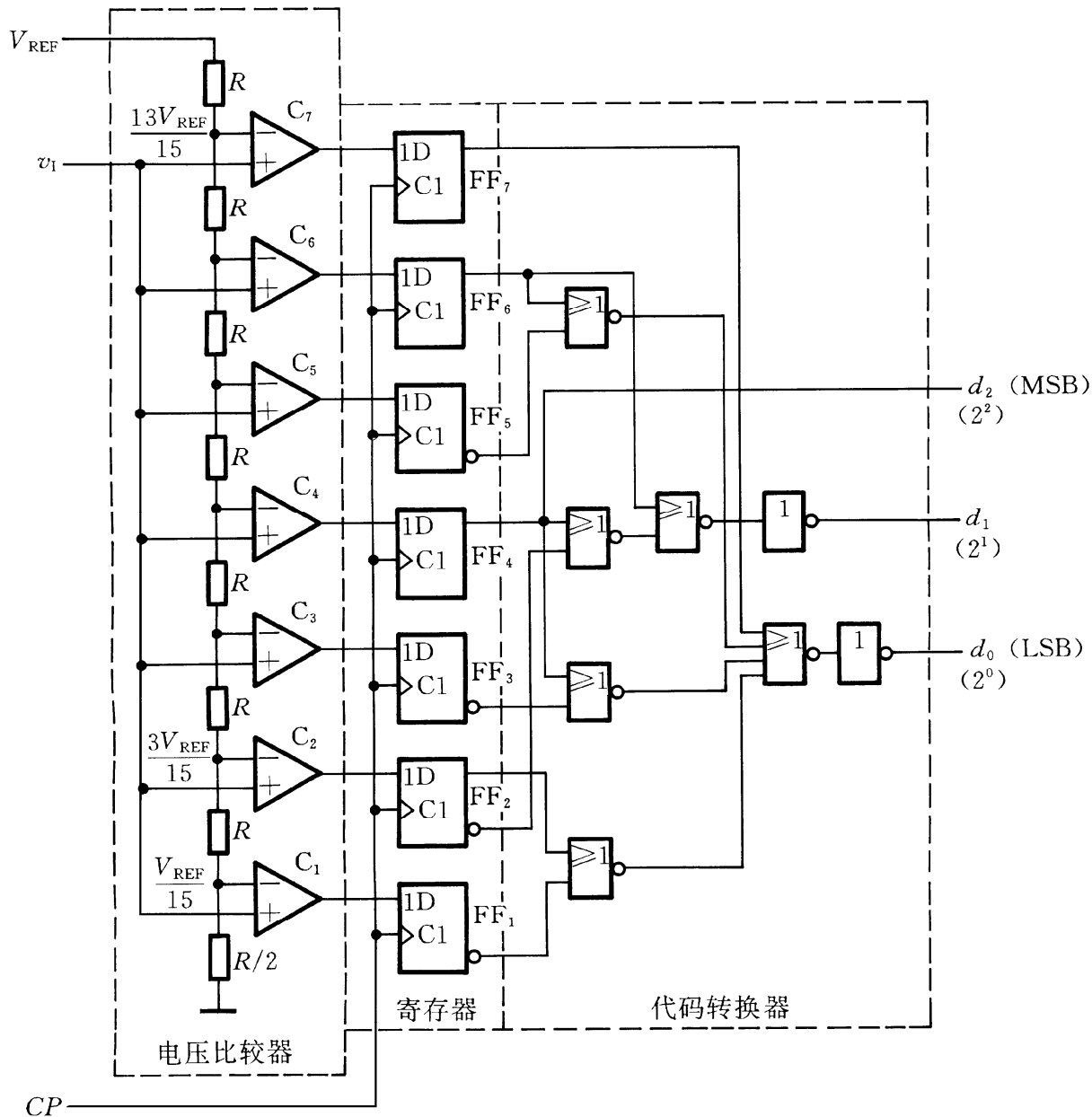
二、直接A/D转换器

并联比较型

$0 \leq v_i < V_{\text{REF}}/15$ 时，7个比较器输出全为0，CP 到来后，7个触发器都置0。经编码器编码后输出的二进制代码为 $d_2 d_1 d_0 = 000$ 。

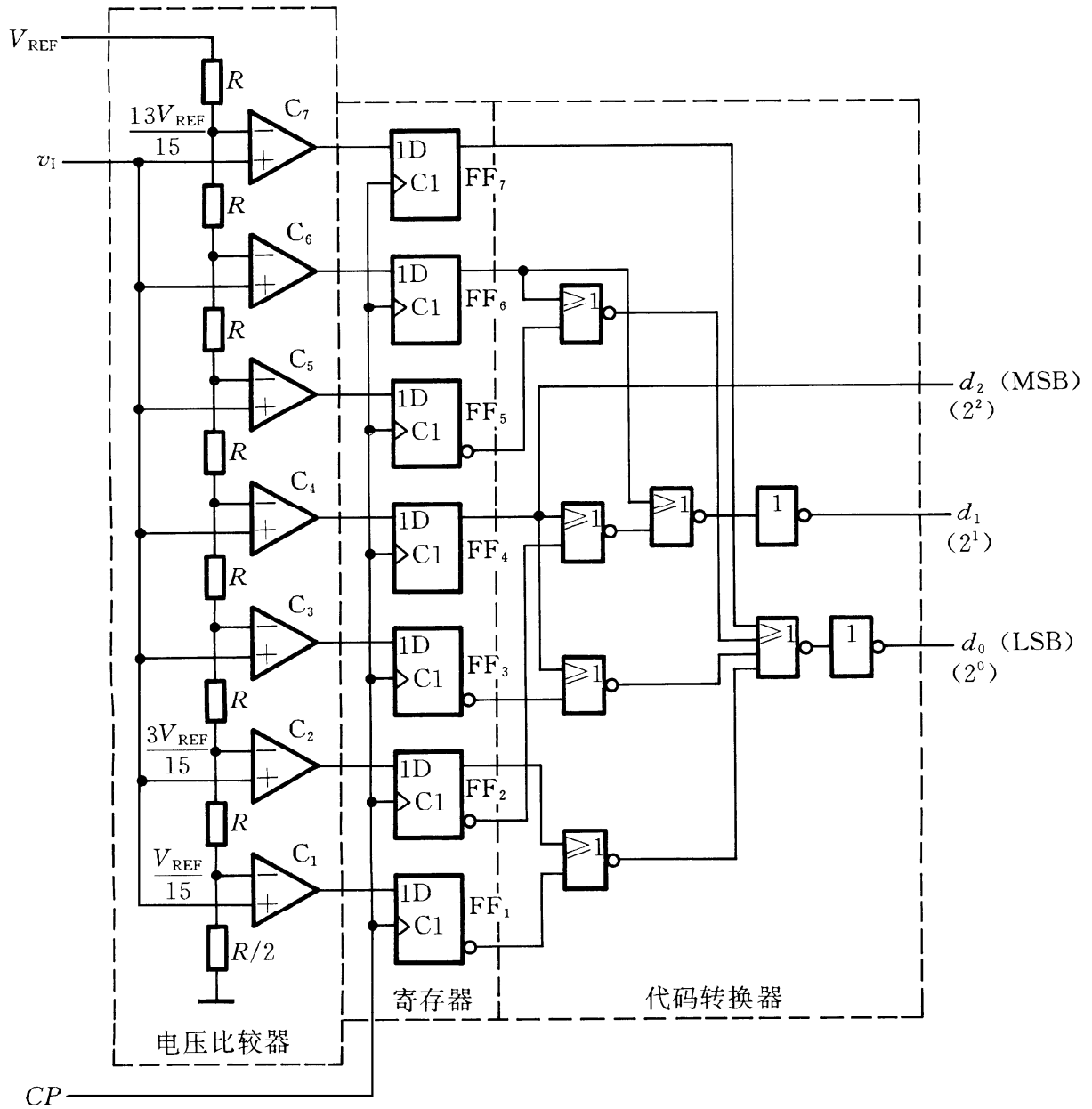


$$\frac{V_{REF}}{15} \leq u_i < \frac{3V_{REF}}{15}$$
 时，7个比较器中只有 C_1 输出为1，CP到来后，只有触发器 FF_1 置1，其余触发器仍为0。经编码器编码后输出的二进制代码为 $d_2d_1d_0=001$ 。



$$\frac{3V_{REF}}{15} \leq u_i < \frac{5V_{REF}}{15}$$

时，比较器中 C_1 、 C_2 输出为1，CP到来后，触发器 FF_1 、 FF_2 置1，其余触发器仍为0。经编码器编码后输出的二进制代码为 $d_2d_1d_0=011$ 。



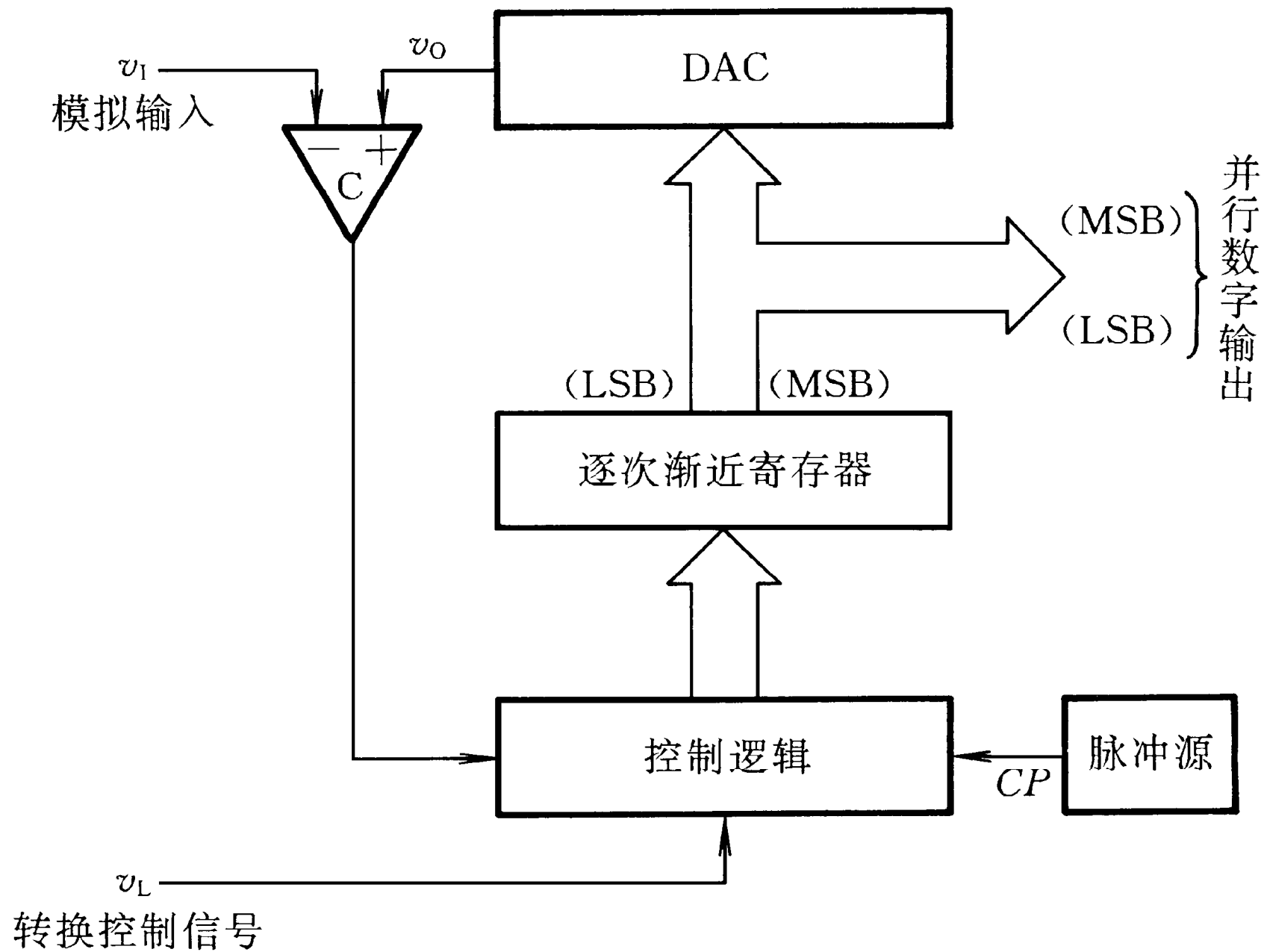
输入模拟电压	寄 存 器 状 态	输出二进制数
u_i	$Q_7 \quad Q_6 \quad Q_5 \quad Q_4 \quad Q_3 \quad Q_2 \quad Q_1$	$d_2 \quad d_1 \quad d_0$
$(0 \sim \frac{1}{15})V_{REF}$	0 0 0 0 0 0 0	0 0 0
$(\frac{1}{15} \sim \frac{2}{15})V_{REF}$	0 0 0 0 0 0 1	0 0 1
$(\frac{2}{15} \sim \frac{3}{15})V_{REF}$	0 0 0 0 0 1 1	0 1 0
$(\frac{3}{15} \sim \frac{4}{15})V_{REF}$	0 0 0 0 1 1 1	0 1 1
$(\frac{4}{15} \sim \frac{5}{15})V_{REF}$	0 0 0 1 1 1 1	1 0 0
$(\frac{5}{15} \sim \frac{6}{15})V_{REF}$	0 0 1 1 1 1 1	1 0 1
$(\frac{6}{15} \sim \frac{7}{15})V_{REF}$	0 1 1 1 1 1 1	1 1 0
$(\frac{7}{15} \sim 1)V_{REF}$	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1

反馈比较型

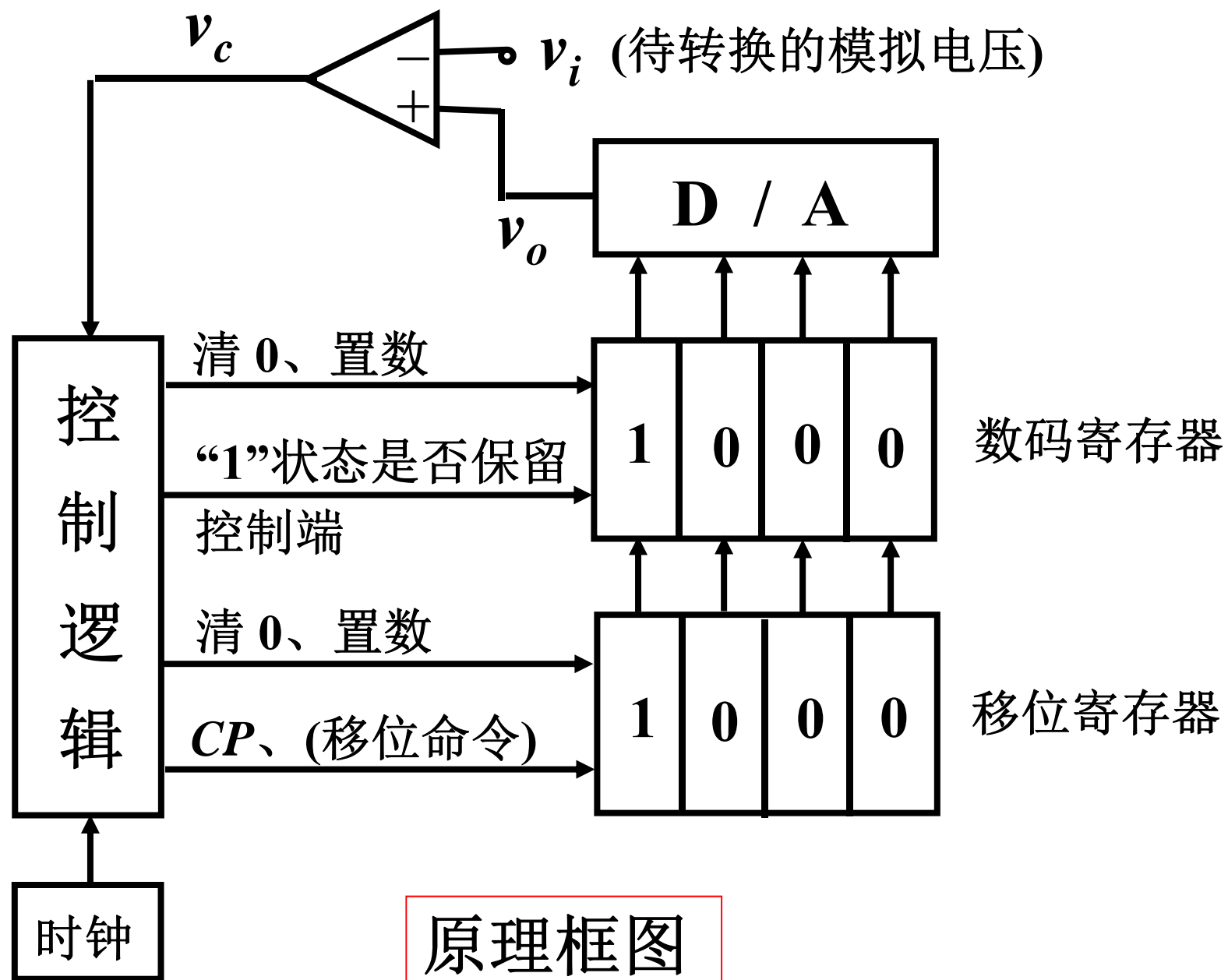
逐次比较型A / D转换器

其工作原理可用天平秤重作比喻。若有四个砝码共重15克，每个重量分别为8、4、2、1克。设待秤重量 $W_x = 13$ 克，可以用下表步骤来秤量：

	砝码重	结 论	暂时结果
第一次	8 克	砝码总重 < 待测重量 W_x ，故保留	8 克
第二次	加4克	砝码总重仍 < 待测重量 W_x ，故保留	12 克
第三次	加2克	砝码总重 > 待测重量 W_x ，故撤除	12 克
第四次	加1克	砝码总重 = 待测重量 W_x ，故保留	13 克



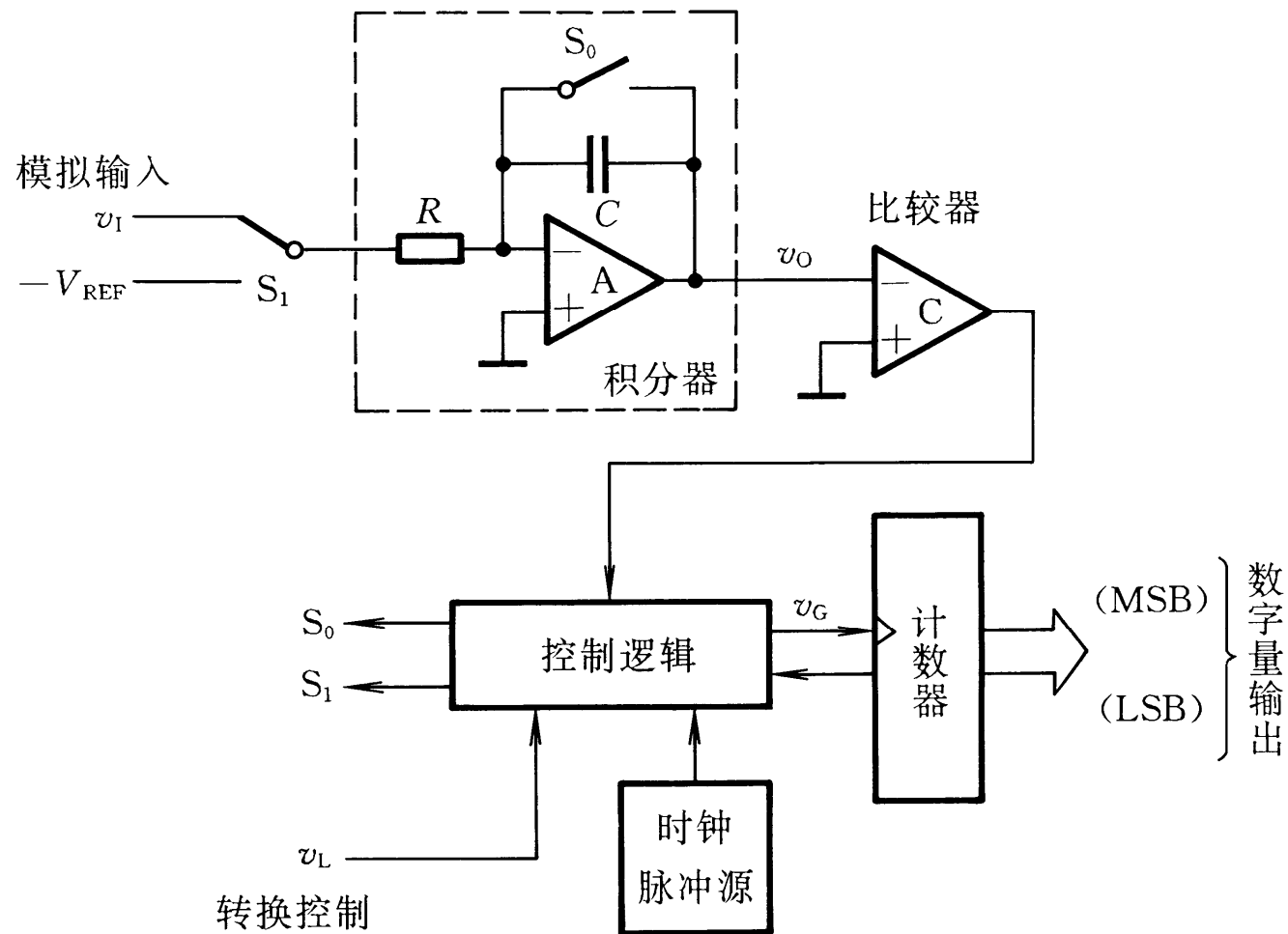
转换开始前先将所有寄存器清零。开始转换以后，时钟脉冲首先将寄存器最高位置成1，使输出数字为100...0。这个数码被D/A转换器转换成相应的模拟电压 u_0 ，送到比较器中与 u_i 进行比较。若 $u_i < u_0$ ，说明数字过大了，故将最高位的1清除；若 $u_i > u_0$ ，说明数字还不够大，应将这一位保留。然后，再按同样的方式将次高位置成1，并且经过比较以后确定这个1是否应该保留。这样逐位比较下去，一直到最低位为止。比较完毕后，寄存器中的状态就是所要求的数字量输出。



原理框图

三、间接A/D转换器

双积分型

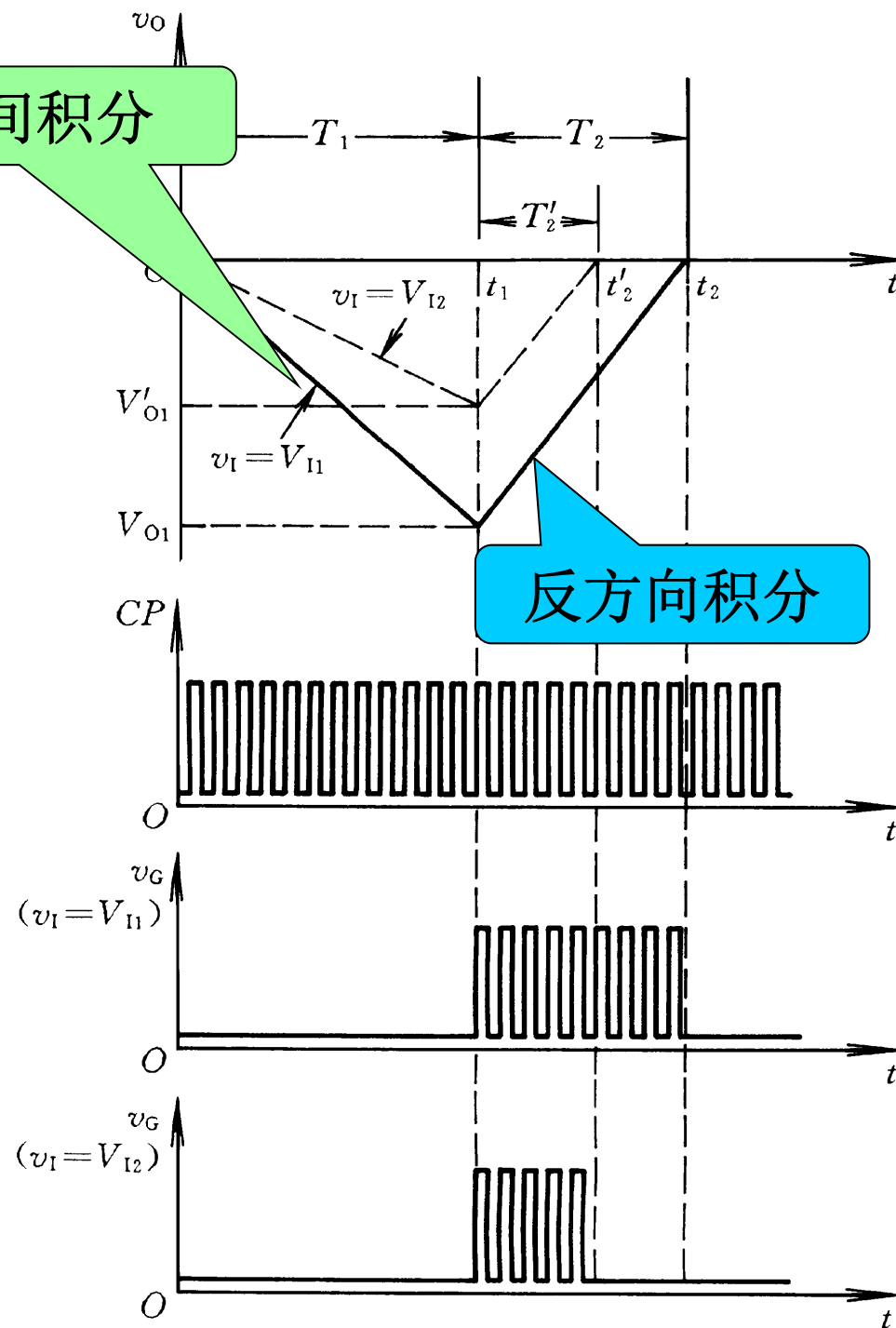


又称为电压—时间变换型（V—T变换型）

固定时间积分

首先使积分电容C完全放电。

第一步，对输入模拟电压进行固定时间 T_1 积分；
第二步，对基准电压进行反向积分，使电容放电，放光为止（即 $v_o=0$ ）。对反向放电时间计数，它与输入幅度成正比。



	转 换 方 式	优 缺 点
并 行 A D C	以固定等级的电压比较输入电压，属多层次的比较，一次比较1个字。	转换速度快，但是难以提高分辨率。
逐 次 逼 近 A D C	与一组已知电压逐个比较，属多次比较，一次比较1位。	转换速度快，转换时间固定，易与微机接口。
双 积 分 A D C	将输入电压与已知电压转换成脉冲数(即时间)进行比较。	抗工频干扰能力强，易实现高精度转换。

四、A/D转换器的主要参数

1.A/D转换器的转换精度

(1)分辨率:

A/D转换器的分辨率用输出二进制数的位数表示，位数越多，误差越小，转换精度越高。例如，输入模拟电压的变化范围为0~5V，输出10位二进制数可以分辨的最小模拟电压为 $5V \times 2^{-10} = 4.88mV$ 。

(2) 转换误差

通常以输出误差最大值的形式给出，一般多以最低有效位的倍数给出。有时也用满量程输出的百分数给出转换误差。

2.A/D转换器的转换速度

转换速度是指完成一次转换所需的时间。转换时间是指从接到模拟输入信号开始，到输出端得到稳定的数字输出信号所经过的这段时间。

END